



РЕПУБЛИКА МАКЕДОНИЈА
УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ ВО СКОПЈЕ
ШКОЛА ЗА ДОКТОРСКИ СТУДИИ

ШКОЛА ЗА ДОКТОРСКИ СТУДИИ

**Пријава за
учество на докторски семинар во зимски семестар
во академската 2019/20 година**

Студент	Сара Сребренкоска
Број на индекс	35
Ментор	Проф. Д-р Владимир Дуковски
Студиска програма	Производно инженерство
Студиска подпрограма	Производно машинство, технологии и системи
Конкурс на запишување на докторски студии	Во академска 2017/2018 година
Број на остварени кредити	
Поле на истражување	Производно машинство, технологии и системи
Тема на докторската дисертација	Роботизирани AFP/ATL процеси за производство на делови од композитни материјали
Наслов на семинарскиот труд (во обем 4-10 страници, на македонски или англиски јазик)	Влијание на технолошките параметри на процесот кај роботизирани LAMP (Laser Assisted Automated Tape Placement) технологии врз карактеристиките на композитот Influence of the technological parameters on laser - assisted automate tape placement (LAMP) process on composite characteristics
Комисија за преглед на семинарскиот труд (три члена предложени од Советот на СП) <i>пополнува Советот</i>	Проф. Владимир Дуковски, ред. проф. (ментор) Проф. Атанас Кочов, ред. проф. (член) Проф. Микојал Кузиновски, ред. проф. (член)

- во прилог семинарски труд/научен труд

Ментор
Проф. д-р Владимир Дуковски

Студент
Сара Сребренкоска

Скопје, 07.11.2019г.

УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ ВО СКОПЈЕ
ШКОЛА ЗА ДОКТОРСКИ СТУДИИ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ
Студиска програма: Производно инженерство

Кандидат: Сара Сребренкоска

Број на индекс: 35

Вработен во: Машински факултет, Универзитет Гоце Делчев во Штип

Ментор: Д-р Владимир Дуковски, редовен професор

Студиска година: трета

ВЛИЈАНИЕ НА ТЕХНОЛОШКИТЕ ПАРАМЕТРИ НА ПРОЦЕСОТ КАЈ
РОБОТИЗИРАНИТЕ LATP (LASER ASSISTED AUTOMATED TAPE PLACEMENT) ТЕХНОЛОГИИ
ВРЗ КАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА КОМПОЗИТОТ

СОДРЖИНА

Технолошкиот процес на автоматско поставување на ленти со помош на ласер (laser-assisted automated tape placement LATP) има висок потенцијал за економично производство на термопластични композитни делови.

Во рамките на овој труд направено е дизајнирање на индустрискиот LATP процес, т.е. направено е планирање на експериментите со користење на полн три - факторен експериментален дизајн и врз основа на план матрицата произведени се композитни примероци. Како материјали користени се два типа различни термопластични унидирекционални (UD) препрег ленти и тоа едната врз основа на полифенилен сулфид и јаглеродни влакна (PPS/CF) и другата врз основа на полиетер етер кетон и јаглеродни влакна (PEEK/CF). Експериментален дизајн беше применет при процесирање на двата препрег материјали, а како највлијателни параметри на процесот беа земени: температура на ласер, агол на поставување на ласер и компактен притисок на ролер. Факторите беа менувани на две нивоа: максимално и минимално односно беше користен 2^3 факторен дизајн. Согласно план – матрицата, беа направени осум експерименти (композитни примероци) со LATP постапка со варирање на нивото на сите три параметри.

За сите добиени композитни примероци беше тестирана јачината на свиткување и врз основа на добиените експериментални податоци беа добиени регресиони равенки кои најдобро го опишуваат процесот. Од регресионите равенки беше заклучено дека температурата и аголот на поставување на ласерот значајно влијаат на јачината на свиткување на примероците комозитни ламинати. Исто така, беше заклучено дека постои интеракција меѓу температурата и притисокот на ролер која исто влијае врз јачината на свиткување.

Клучни зборови: термопластичен препрег, експериментален дизајн, автоматско поставување на ленти, композитни плочи, јачина на свиткување

ABSTRACT

Thermoplastic part manufacture by laser-assisted automated tape placement (LATP) process has a high potential for the cost-effective production. Within the frames of this paper it was applied a designing of the industrial LATP process, i.e. planning of the experiments and on the basis of the plan matrix, the specimens were manufactured. Namely, two different thermoplastic prepreg materials were used: one based on polyphenylene sulfide and carbon fibers (PPS/CF) and other based on polyether ether ketone and carbon fibers (PEEK/CF). The planning of experiments was made separately for processing of these prepreg materials and as the most influenced factors were taken: laser temperature, compact pressure of roller and laser placement angle. The factors were changed on two levels: maximum and minimum, i.e. 2^3 factorial design

was used. According to the plan matrix, eight experiments (composite samples) with LATR procedure were performed by varying the level of all three parameters.

For all manufactured specimens the flexural strength was tested and on the basis of the received experimental data it was created the regression equations which the best describes the processes. The regression equations showed that the temperature and the angle of laser placement significantly influence on the bending strength of the composite laminates. It was also found that there was an interaction between temperature and roller pressure which also affected the bending strength.

Key words: thermoplastic prepreg, experimental design, automated tape laying, composite plates, flexural strength

1. ВОВЕД

Зголемената примена на термопластичните композитни материјали врз основа на јаглеродни влакна во авионската и автомобилската индустрија резултира во високи побарувања за стапката на производство и економичноста на технолошките процеси. Различни форми на автоматски процеси за поставување се користат за да постигнат овие предизвици и истите користат термореактивни и термопластични материјали. Економично производство на средни и големи композитни делови главно за авионска индустрија може да се постигне со примена на процесите со автоматско поставување на влакна (AFP) и автоматско поставување на ленти (ATR) и со користење на термопластични препрег материјали [1-4]. Термопластичните композити можат да се применат како структурни делови во разни индустриски апликации благодарение на нивните предности поврзани со процесибилноста и нивната компатибилност со животната средина. Процесот на поставување на ленти е една од ретките техники кои имаат потенцијал да процесираат термопластични композити за голема индустриска примена. Традиционалниот процес на поставување лента за добивање на термореактивни композити вклучува дополнителен чекор на вмрежување (печење) после операцијата за поставување. Доделка, автоматизирани процеси за поставување на термопластични ленти нудат предност со тоа што консолидацијата е на самото место. Механичките перформанси на крајните композитни делови зависат од многу фактори. Треба композитните делови да бидат без празнина и добро да се консолидирани за сигурна употреба во структурата. Термичката деградација на прегрегот за време на процесирањето треба да биде минимална со цел материјалот да ги задржи своите својства. Неговата кристалност треба да биде во рамките на препорачаниот опсег за материјалот да ги постигне оптималните својства [5, 6].

Процесот на автоматско поставување ленти со помош на ласер (LATR) заедно со технологијата надвор од автоклав се важни за намалување на трошоците при добивање на примарни композитни ламинатни структури врз основа на термопластичен материјал и тоа од едноставни рамни делови до сложени тродимензионални делови. Оваа комбинација ветува брзо, сигурно и економично производство. Избегнувањето на автоклав за време на процесот на процесирање не само што ги намалува трошоците, туку и отвора можности за употреба на поедноставни алати. Меѓутоа, недостатокот на искуство од користење на ATR машината со ласер заедно со технологијата надвор од автоклав резултира во добивање на композитни ламинати подложни на празнини и области богати со смола. Ова се најголемите проблеми за успешно спроведување на овие технологии и многу истражувања се насочени кон решавање на истите [7, 8].

За време на производниот процес, ламинатот е подложен на неколку циклуси на греење и ладење што резултира во преостанати напони во крајниот ламинат. Внесувањето на топлина со помош на радијативно загревање нуди предности за овие процеси и е добро воспоставено во различни форми. Греењето и ладењето зависат од многу параметри, како што се брзината на поставување, температурата на ласерската моќност, секвенците за поставување, температурата на околината итн. Системот за поставување ленти со помош

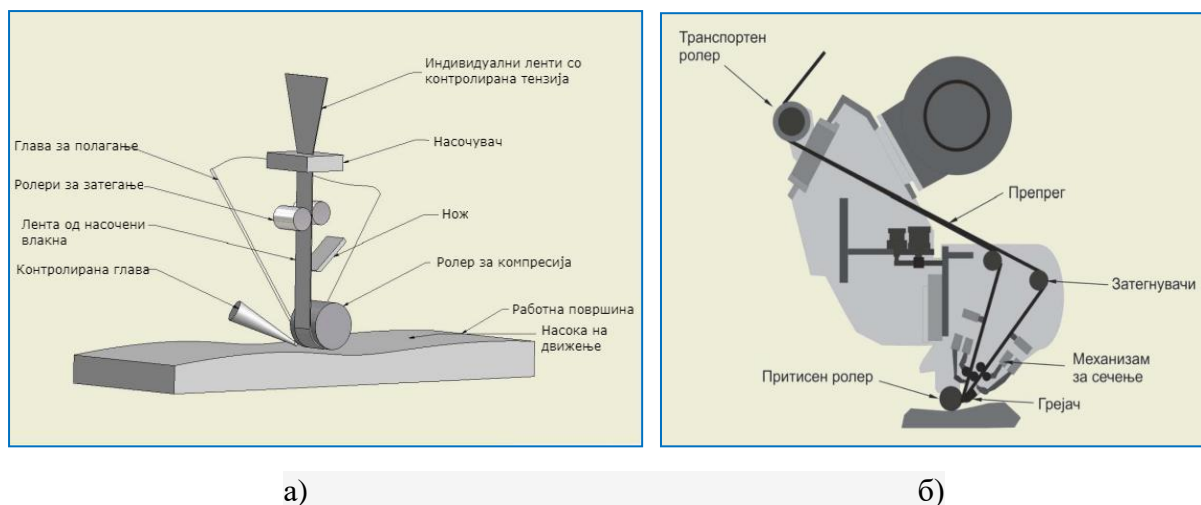
на ласер е опремен со сензори за мерење на температурата и притисокот врз профилите што овозможува подобрување на врската во загреаниот регионот. Соодветната температура и притисок се внесуваат во системот за да се обезбеди добро поврзување на поставените ленти препрег со цел да се добие соодветната и посакуваната јачина на произведениот термопластичен ламинат [2-5].

Топлината која се користи во сите овие процеси е за различни цели, на пр. да се лепи материјалот на алатка или да се стопи термопластичната препрег компонента и слично. Истражувани се различни технологии за греење кои вклучуваат примена на топол гас, инфрацрвена светлина, контактни грејачи и различни ласери [9]. Греење врз основа на зрачење во форма на ласерски и инфрацрвени ламби, нуди предности како што се голем флуks на топлина, прецизна контрола како и брза реакција и затоа се сметаат за фаворизирани извори на топлина за процесите на АТР [2, 4, 10-13]. Карактеристиките на материјалот како што се степеност на кристалност и содржината на празнина зависат суштински од термичката историја на ламинатот, а тоа значајно влијае на механичките својства на крајниот композитен дел [2, 12, 14-18]. Затоа, прецизно познавање и следење на температурата е од голем интерес. Термичкото моделирање и анализата на изворите на зрачење на топлина се детално истражени за специфични апликации [19-21].

Автоматското поставување на термопластични ленти бара влез на топлина за да се стопи термопластичниот полимер и да се поврзе на основниот слој [9, 12, 15]. За да се постигне ова, треба да се загреат и влезниот материјал и подлогата [16, 17]. Со компресирање на материјалот со компактен ролер, се овозможува консолидација на самото место, со што циклусот во автоклав се избегнува [5, 7, 9, 11]. Schledjewski [21] анализираше различни извори на топлина, вклучувајќи различни типови на ласери, топол гас, инфрацрвени ламби под различни критериуми како максимално достапна моќност, деградација на материјалот и др. и заклучил дека современите ласери со диоди се најдобриот извор на топлина во сите важни критериуми за автоматските процеси за поставување на термопластични препрези, а како единствен недостаток смета дека е недоволното знаење за нив. Производството на топлина со ласер претставува најпосакуваниот избор при користење на полимери кои бараат високи температури на процесирање како што се полиетер етер кетон (ПЕЕК) ($> 380^{\circ}\text{C}$) или полифенил сулфид (PPS) (343°C) [7, 11, 14, 21]. Денешните ласерски извори се сметаат за ефикасни и овозможуваат поголем проток на топлина и подобра контрола на процесите [21 - 25].

Технолошкиот процес на автоматско полагање на препрег ленти е комплексен систем од елементи. Овој процес овозможува употреба на различни брзини на полагање препрег ленти, симултано температурно процесирање (загревање или ладење), употреба на притисок за консолидација на препрегот на површината врз која се полага, опции за контрола на индивидуалното движење и засебно независно затегнување на секоја препрег лента. За време на процесот, секоја композитна препрег лента се влечи од посебна шпулна која е сместена во систем за затегнување (тензионер). Од тензионерот, преку транспортен систем се влечи секоја индивидуална лента кон главата за полагање преку која се полага препрег материјалот. На главата има специјален уред за сечење на индивидуалните ленти една по една и рестартирање на нивниот програм со што процесот се повторува [2]. Слика 1 а) ја прикажува општата поставеност во процесот на автоматско полагање на препрег со радијален извор на топлина. Една од главните компоненти на комплексната опрема за производство е главата за поставување ленти која се користи во АТР, прикажана на слика 1 б). На неа има еден клучен елемент, а тоа е притисниот ролер. Негова функција е да нанесе притисок при поставување на препрег лентите врз површината, да ги консолидира и поврзе со подолните слоеви. Со програмирана контрола на притисниот ролер, можно е и притисокот да се променува за време на еден циклус. Друг важен елемент, неопходен за реализација на оваа технологија е загревањето. Пожелно е препрег лентите да се одржуваат на пониска температура се до поставувањето, со цел да се спречи нивно лепење низ транспортниот систем (на ролерите за менување насока или на

механизмот за сечење). Температурата треба да е повисока на местото на нивниот излез од главата, односно онаму каде што тие се поставуваат на површината, а зголемената температура придонесува за нивна консолидација и лепење со подолните слоеви.



Слика 1. а) Шематско претставување на автоматскиот процес на поставување ленти; б) Глава за поставување препрег ленти

Постојат голем број на параметри кои влијаат на квалитетот на конечниот термопластичен композит во процесот на LATP и кои влијаат на механичките својства на истиот [3-6]. Поврзувањето на полукристални термопластични UD ленти со процесот на ATP со помош на ласер е анализирано во многу студии. Во сите истражувања авторите се обидуваат да ја измерат дистрибуцијата на температурата во близина на зоната на поврзување (слепување) на слоевите препрег [3-18]. Топлинската историја на композитниот материјал за време на процесирање со примена на процесот ATP со помош на ласер е од голема корист за разбирање на квалитетот на врската и својствата што се контролираат како на пр. кристалност, содржина на празнини и сл.

Во рамките на овој труд анализирано е влијанието на некои технолошки параметри во процесот ATP со помош на ласер при процесирање на два типови термопластични препрег материјали. Ова истражување ги презентира и дискутира некои варијабли на ласерскиот систем за контрола и крајните својства на примероците - ламинатни плочи, произведени со конвенционален LATP процес.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН ДЕЛ

За истражувањето во рамките на овој труд беа користени два типови термопластични унидирекционални препрега материјали (UD1 и UD2) за производство на термопластични композитни панели. UD1 и UD2 препрег материјалите се врз основа на едностраночни јаглеродни влакна (AS4 јаглеродни влакна) и термопластични матрици и тоа полифенилен сулфид - PPS (Ticona 0214 PPS) и полиетер етер кетон PEEK (Vitrex 150 PEEK), соодветно за UD1 и UD2, од производителот Suprem, Швајцарија. Произведени беа композитни примероци – ламинатни панели со помош на глава за автоматско поставување на препрег лента со помош на ласер (LATP), произведена од Микросам, Македонија. Главата е прикачена на роботска рака, како што е прикажано на слика 2. Главата се состои од: ролер за консолидација (надворешен дијаметар од 90 mm); лента за водење, систем за затегнување и за сечење за UD препрег лентата, оптички леќи поврзани со извор на топлина (3 kW диоден ласер) и сензор за температура (пирометар).



Слика 2. Автоматско поставување на UD1 и UD2 препрег ленти со помош на машина произведена од Микросам

Процесот на поставување на препрег лента вклучува повлекување на термопластичната препрег лента преку соодветен систем и понатамошно водење. На патот кон ролерот за консолидација, препрег лентата се загрева на температура (врз основа на видот на полимерот) со помош на ласер. Лентата потоа се става на алатот и се консолидира со ролер. За време на поставувањето на лентата, постојат повеќе влијателни параметри како што се: брзина на поставување, температура на лента, ласерска температура, затегнатост на лента, вид на ласерска оптика, ладење на мандреал, ладење на ролер, компактен притисок на ролер итн.

Композитните примероци беа произведени со осум слоеви препрег така што дебелината на добиените ламинатни панели беше $\sim 1,5 \text{ mm}$. Беше направено планирање на експериментите односно беше применет полн три факторен експериментален дизајн (full factorial experimental design - FFED), а согласно тоа беа произведени композитни примероци – ламинатни панели, со употреба на три параметри и две нивоа на варијација (2^3 факторен експериментален дизајн). Во FFED, температура на ласер беше земена за прв фактор, вториот фактор беше - агол на поставување на ласер, а третиот фактор - компактен притисок на ролерот. Експерименталниот дизајн беше направен за LATP процесите за добивање на ламинатни панели од два типови на термопластични препрег материјали, а ознаките на примероците се LATP-UD1 за ламинат врз основа на UD1 и LATP-UD2 за ламинат врз основа на UD2. Одредувањето на нивото на факторите и кодирањето на променливите (факторите) беше направено во согласност со Табела 1, соодветно за двата типови материјали. Имено, за првиот фактор (примерок LATP-UD1) ниското и високото ниво се на 360°C и 380°C соодветно, за вториот фактор - на 270N и 370N соодветно, и за третиот фактор - на 22° и 25° . Секој фактор има две нивоа на варијација, ниско и високо. Ниското има вредност (-1), а високото има вредност (+1). Постојат две нивоа на факторите $p = 2$ и осум комбинации ($N = 8$, Табела 2):

$$N = p^k = 2^3 = 8 \quad (1)$$

каде: N = комбинации; k = број на фактори; p = број на нивоа на факторите.

Во согласност со FFED процедурата сите можни комбинации на факторите беа земени на сите нивоа на варијација (8 експерименти, Табела 3).

FFED овозможува математичко моделирање на истражуваниот процес во близина на избрана експериментална точка во рамките на студираниот домен. Со цел да се вклучи целиот студирани домен, избрани се централните точки (нулта ниво, $x_i = 0$) од двата опсега да бидат експериментални точки. За примероците LATP-UD1 за температура на ласер беше избрана експерименталната точка да биде 370°C , за компактен притисок на ролер - 320 N и за агол на поставување на ласер - $23,5^\circ$ (што одговара на претходно дефинираните нивоа). Исто така, беа избрани централните точки за примероците LATP-UD2 (Табела 1). За статистичката анализа беа реализирани по пет тестови од секоја комбинација, така што бројот на репликации е пет. Беше користен линеарен модел од прв ред со интеракции меѓу факторите за да се предвиди функцијата на одзив, т.е. јачината на свиткување на ламинатните примероци во студираниот домен.

Табела 1. Кодирање на факторите за сите примероци

Примерок со ознака LATP-UD1			
<i>Код</i>	Температура на ласер, °C X_1	Агол на поставеност на ласер, ° X_2	Компактен притисок на ролер, N X_3
Нулто ниво, $x_i = 0$	370	23,5	320
Интервал на варијација	10	1,5	50
Горно ниво, $x_i = +1$	380	25	370
Долно ниво, $x_i = -1$	360	22	270
Примерок со ознака LATP-UD2			
Нулто ниво, $x_i = 0$	450	23,5	457,5
Интервал на варијација	30	1,5	72,5
Горно ниво, $x_i = +1$	480	25	530
Долно ниво, $x_i = -1$	420	22	385

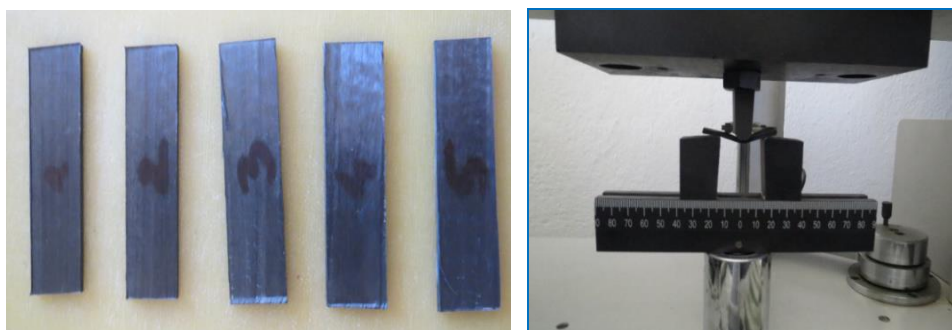
Табела 2. 2^3 факторен еспериментален дизајн

<i>N</i>	План матрица на експериментот							
	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
2	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
3	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
4	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
7	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1

Беше направено истражување за ефектот на технолошките параметри врз механичките својства на ламинатните панели. Тестирањето на добиените композитни примероци за јачина на свиткување беше извршено според ASTM D790 (Слика 3). Врз основа на направените тестови за свиткување во три точки (three-point bending test - 3pb), подготвените примероци беа изложени на свиткување до нивно кршење, а врз основа на добиените сили и димензии на примерокот беше пресметана јачината на свиткување соодветно, според стандардот ASTM D 790. Тестирањето се вршеше на собна температура со употреба на универзална машина за тестирање со максимално оптоварување од 50 kN и брзина на оптоварување од 5 mm/min. Ширината и дебелината на секој примерок беше измерена со микрометар (со читање на најмалку 0,0254 mm). Примероците беа тестирани во Лабораторијата за полимерни композит во Ламинати, Прилеп.

Табела 3. Услови на експериментот

N	Фактори				
	X ₁ (°C)		X ₂ (°)	X ₃ (N)	
	LATP-UD1	LATP-UD2	LATP-UD1 LATP-UD2	LATP-UD1	LATP-UD2
1	380	480	25	380	530
2	360	420	25	380	530
3	380	480	22	380	530
4	360	420	22	380	530
5	380	480	25	270	385
6	360	420	25	270	385
7	380	480	22	270	385
8	360	420	22	270	385



Слика 3. Подготвени примероци и тестирање на еден примерок

3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

3.1. Јачината на свиткување за примероци со ознака LATP - UD1

Резултатите од тестирањето на јачината на свиткување за композитните примероци со ознака LATP - UD1 со пет репликации за секоја комбинација се прикажани во Табела 4. Исто така, во табелата се дадени пресметките за статистичките параметри: - аритметичка средина на резултатите - \bar{y} и S_j^2 - дисперзија на резултатите.

Со примена на 2^3 факторен експериментални дизајн беше добиено дека функцијата на одзив во кодирани променливи, е следната:

$$y = 936,80 + 31,7X_1 - 1,47X_2 + 42,56X_3 + 3,31X_{12} + 13,09X_{13} + 11,38X_{23} - 0,57X_{123} \quad (2)$$

Во експерименталниот дизајн, термините X_1X_2 , X_1X_3 , X_2X_3 и $X_1X_2X_3$ се интеракција помеѓу факторите што исто така може да имаат влијание врз одзивот, во нашиот случај јачината на свиткување (y вредност). Беше пресметана средната вредност на дисперзијата според равенката:

$$S_j^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2 \quad (3)$$

Напрвена беше и проценка за дисперзијата според Кохренов критериум и беше заклучено дека дисперзијата на резултатите е хомогена. Нивото на значајност во

пресметките беше земено за 0,05 што значи дека добиените резултати се пресметани со точност од 95%. (само 5 % грешка). Потоа, беа определени регресионите коефициенти и нивната значајност според Студентовиот критериум. Според табелата 4, минималната пресметана вредност за значајност на регресионите коефициенти (параметарот Δbi) за примероците со ознака LATP-UD1 е 30,67. Тоа значи дека секој коефициент по апсолутна вредност треба да биде поголем од или еднаков на 30,67.

Табела 4. Резултати од тестирањето за јачина на свиткување

N	y_{j1}	y_{j2}	y_{j3}	y_{j4}	y_{j5}	\bar{y}	S_j^2
1	975,77	980,43	1028,89	1120,00	1078,96	1036,81	3916,11
2	1026,43	955,57	932,83	862,76	931,07	941,73	13795,70
3	1010,29	1062,21	927,05	987,78	1070,17	1011,50	13709,17
4	837,18	963,41	1014,33	882,96	903,15	927,41	14355,64
5	869,12	815,17	931,19	977,36	926,56	903,88	3934,51
6	783,96	919,37	885,71	913,09	792,39	858,90	17352,05
7	847,68	858,76	919,25	991,11	992,34	921,83	19254,82
8	922,32	901,20	840,96	943,84	853,55	892,37	7773,27
$\sum_{N=1}^8 S_j^2$							78390,14
$\frac{\sum_{N=1}^8 S_j^2}{8}$							9798,768121
S_{bi}^2							244,9692
Δbi							30,67

Со анализа на регресионата равенка, беше забележано дека главниот позитивен придонес за y се температурата на ласерот како процесен параметар X_1 и компактниот притисок на ролерот како процесен параметар X_3 . Аголот на поставување на ласерот незначително влијае врз јачината на свиткување. Исто така, интеракцијата на било кои два фактори има помал ефект врз јачината на свиткување отколку влијанието на факторите одделно. Интеракцијата на трите фактори со коефициент - 0,57, исто така, има занемарлив негативен ефект врз јачината на примероците. Тоа значи дека тие членови можат да бидат изоставени во регресната равенка и крајната функција на одзив со грешка од 5% се добива дека е:

$$y = 936,80 + 31,7X_1 + 42,56X_3 \quad (4)$$

Со примена на Фишеровиот критериум беше направено тестирање и споредба на пресметаните вредности според добиената регресиона равенка со резултатите добиени од експериментот (табела 5). Вредностите за y_p беа пресметани со помош на формула 4. Ако варијабилноста на моделот е помала од експерименталната стандардна девијација, тогаш моделот може да се прифати и понатаму да се користи (Формули 5 - 7).

Табела 5. Резултати добиени од експериментот \bar{y} и пресметаните според регресионата равенка y_p

N	\bar{y}	y_p	$(\bar{y} - y_p)$	$(\bar{y} - y_p)^2$
1	1036,81	1011,06	25,747	662,8911372
2	941,73	947,66	-5,92913	35,15455756
3	1011,50	1011,06	0,437296	0,191227962
4	927,41	947,66	-20,2548	410,25857
5	903,88	925,95	-22,065	486,8658601
6	858,90	862,55	-3,64488	13,28512606
7	921,83	925,95	-4,11893	16,96559666
8	892,37	862,55	29,82885	889,760008
$\sum_{j=1}^N (\bar{y} - y_p)^2 =$				2515,37208

$$F_p \leq F_t \quad (5)$$

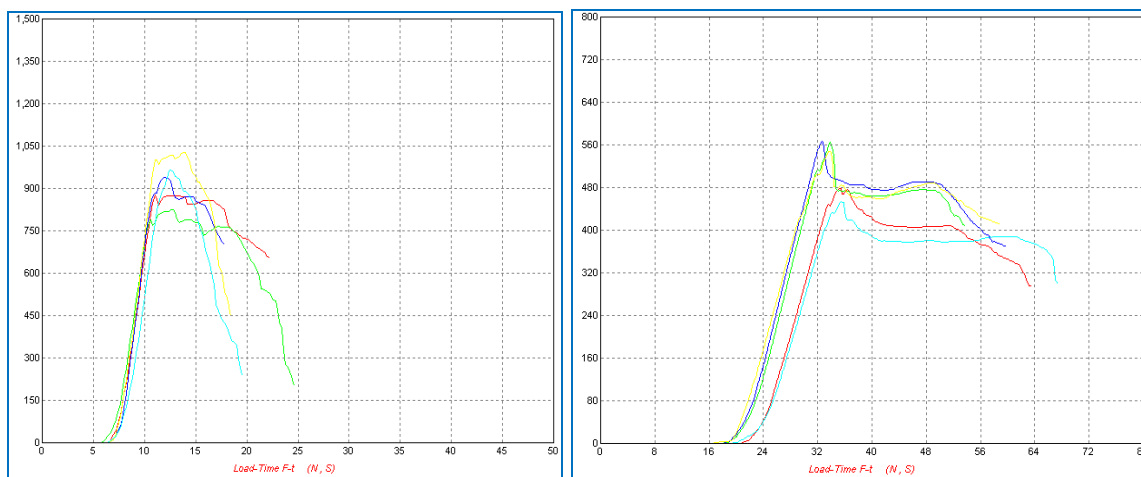
$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_j^2} \quad (6)$$

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - y_j)^2}{N-k} \quad N - k = 8 - 3 = 5 \quad (7)$$

Врз основа на определената разлика меѓу пресметаните и експерименталните вредности, беше добиено дека $F_p = -0,2567$. Табеларната вредност за критериумот на Фишер за $P = 0,95$; $f = (n-1) = 5 - 1 = 4$ и $N = 8 \times (5-1) = 32$ е $F_t = 2,69$ и тоа значи дека моделот е соодветен. Бидејќи варијабилноста на моделот е помала од експерименталното стандардно отстапување, моделот може да се прифати и понатаму да се користи.

На сликите 4 се прикажани дијаграми сила - време за примероци (серија 1 и серија 6) со највисоки и најниски вредности за јакост на свиткување.

Кривите сила - време за примероците серија 1 (пет репликации) се слични и композитните ламинирани примероци имаат линеарно однесување со зголемување на силата се до пукање (деструкција) на првите слоеви. Потоа, изгледот на кривите за повисоки вредности на силите продолжува како цик-цак што одговара на деструкција на останатите слоеви на влакна. Во случајот со примероците од серија 6, исто така постои линеарно однесување се до пукање на првите слоеви на влакна, но примероците сè уште не се целосно деструктуирани. Кривите продолжуваат да имаат изглед кој е како линеарен при понатамошно оптоварување се до комплетно пукање на примероците. Добиените резултати од експериментите укажуваат на влијанието на компактниот притисок на ролерот и ласерската температура врз механичките својства на композитните примероци. Имено, поголемиот компактен притисок на ролерот и повисоката температура на ласерот влијаат на добивање на ламинатни панели со поголеми јачини на свиткување. Во полимерниот композит, секој слој има придонес кон вкупната јачина и кога еден од слоевите во структурата ќе почне да се деструктуира, влијае и на деструкцијата на матрицата околу и се појавува зголемување на пукнатината и слојот комплетно се деструктуира. На таков начин се намалува дебелината на примерокот која може да издржи оптоварување бидејќи еден или повеќе слоеви се деструктуирале. Бидејќи дебелината на зидот на ламинатните плочи е намалена, таа не може да носи повеќе оптоварување со зголемување на силата и се деструктуира комплетно [26,27].



Слика 4. Дијаграми сила - време за примероци LATP-UD1: серија 1 и серија 6

3.2. Јачината на свиткување за примероци со ознака LATP – UD2

Резултатите од тестирањето на јачината на свиткување за композитните примероци со ознака LATP – UD2 со пет репликации за секоја комбинација се прикажани во Табела 6. Со примена на 2^3 факторен експериментални дизајн беше добиено дека функцијата на одзив во кодирани променливи, е следната:

$$y = 965,11 + 68,00X_1 - 2,28X_2 + 50,98X_3 + 25,22X_{12} - 19,40X_{13} + 43,13X_{23} + 7,92X_{123} \quad (8)$$

Според табелата 6, минималната пресметана вредност за значајност на регресионите коефициенти за примероците со ознака LATP-UD2 е 49,20. Според тоа, крајната функција на одзив со грешка од 5% го добива изгледот како што е дадено со равенка 9.

Со анализа на регресионата равенка, беше забележано исто така дека и во случај на примероци LATP - UD2, главниот позитивен придонес за y се температурата на ласерот како процесен параметар X_1 и компактниот притисок на ролерот како процесен параметар X_3 . Влијанието на аголот на поставување на ласерот и интеракцијата на два и три фактори влијаат незначително на јачината на свиткување и истите (фактори X_2 , X_1X_2 , X_1X_3 , X_2X_3 и $X_1X_2X_3$) може да бидат изоставени во регресионата равенка:

$$y = 965,11 + 68,00X_1 + 50,98X_3 \quad (9)$$

Пресметаните вредности y_p според добиената регресиона равенка (формула 9) и резултатите добиени од експериментот се дадени во табела 7. Со примена на Фишеровиот критериум беше добиено дека $F_p = 0,1861468$, а табличната вредност $F_t = 2,69$ што значи дека варијабилноста на моделот е помала од експерименталната стандардна девијација и моделот е адекватен и може да се користи во иднина (Формули 5 - 7).

Табела 6. Резултати од тестирањето за јачина на свиткување

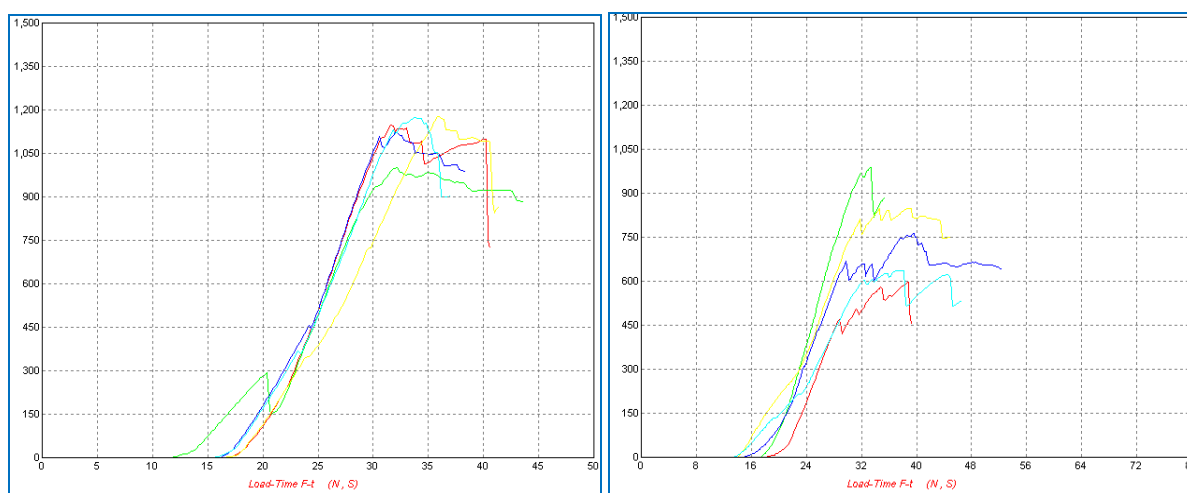
N	y_{i1}	y_{i2}	y_{i3}	y_{i4}	y_{i5}	\bar{y}	S_j^2
1	1118,66	976,34	1129,85	1184,31	1284,20	1138,67	12522,40
2	990,66	914,16	822,52	1087,40	1061,23	975,20	47264,00
3	954,72	1019,28	1024,54	872,62	1082,32	990,69	25593,43
4	821,73	1087,31	945,38	942,10	1002,39	959,78	37658,48
5	1033,95	954,48	915,45	896,35	1066,89	973,42	5514,90
6	684,00	885,37	708,09	755,40	787,26	764,03	24870,07
7	1159,59	857,46	1034,88	1025,20	1071,14	1029,65	48302,27
8	842,06	1031,63	795,32	837,97	940,19	889,44	36549,96
$\sum_{N=1}^8 S_j^2$							202197,91
$\frac{\sum_{N=1}^8 S_j^2}{8}$							25274,7383
S_{bi}^2							631,8685
Δbi							49,20

Табела 7. Резултати добиени од експериментот \bar{y} и пресметаните според регресионата равенка y_p

N	\bar{y}	y_p	$(\bar{y} - y_p)$	$(\bar{y} - y_p)^2$
1	1138,67	1084,09	54,585	2979,477573
2	975,20	948,09	27,10926	734,911971
3	990,69	1084,09	-93,392	8722,066849
4	959,78	948,09	11,69816	136,8468416
5	973,42	982,13	-8,71007	75,86527534
6	764,03	846,13	-82,1093	6741,933225
7	1029,65	982,13	47,51748	2257,911174
8	889,44	846,13	43,30186	1875,051146
$\sum_{j=1}^N (\bar{y} - y_p)^2 =$				23524,06405

На слика 5 се прикажан дијаграмите сила - време за примероци со повисоки вредности за јачина на свиткување (LATP-UD2 серија 1) и за примероци со пониски вредности за јачина на свиткување (LATP-UD2 серија 6). Како што може да се види од слика 5, однесувањето на примероците кога на нив се дејствува со сила е слично, имено, постои линеарно однесување до деструкција на првиот зајакнувачки слој. Примероците од серија 1 се добиени на процесни услови каде анализираните фактори се на горно ниво, додека примероците од серија 6 се добиени на процесни услови каде температурата на ласер и компактниот притисок на ласер се на долно ниво, а аголот на поставување на ласер на горно ниво. Резултатите од тестирањето на примероците LATP-UD2 покажаа дека повисоката температура на ласер и поголемиот компактен притисок на ролерот резултираат во повисоки вредности за јачината на свиткување на ламинатните панели. Колку подолго препрег материјалот се наоѓа на температура на топење, олеснета е дифузијата на полимерниот ланец помеѓу слоевите, а тоа резултира во добар интерфејс и

добри механички својства. Целта на компактниот ролер за консолидација е да се компресираат заробените воздушни празнини со примена на доволен притисок врз стопениот материјал. Во исто време, ролерот за консолидација помага лентата препрег да дојде до непречен контакт со слоевите на подлогата (веќе поставени) и да се оствари меѓу нив добар интерфејс. Зголемувањето на силата на набивање преку ролерот исто така може да резултира во подобра консолидација и поголеми јачина на поврзување на слоевите, а со тоа и поголеми механички карактеристики на ламинатот. Во многу истражувања направени се разни симулации и анализиран е степенот на подобрување. Khan et al. [25] ја анализираше промената на празнините на ламинат со 15 слоеви и тоа при варијација на компактна сила од 50 до 5000 N. При мала брзина на процесирање, феноменот на деконсолидација на празнините во грејниот регион пред ролерот бара многу голема консолидациона сила, а дополнително потребно е да има и притисок на ролер при ладење со цел да ја замрзне таа состојба. Од друга страна, примената на поголеми брзини во комбинација со поголема моќност на ласер (повисоки температури) може да ја зголемат стапката на производство. Затоа варијацијата на овие два параметра е истражувана во многу трудови [20-25].



Слика 5. Дијаграми сила - време за примероци LATP-UD2: серија 1 и серија 6

4. ЗАКЛУЧОК

Во рамките на истражувањата во семинарскиот труд беше анализирано влијанието на некои технолошки параметри при процесирање на два типови термопластични композити врз основа на PPS и PEEK и јаглородните влакна, со примена на LATP процес. Беше применет полн три факторен експериментален дизајн и тоа со варирање на трите фактори на две нивоа и според план матрицата беа произведени по осум примероци – ламинатни панели од двата типови препрег материјали и тоа на различни услови на процесирање (на сите можни комбинации на факторите и на сите нивоа на варијација). За сите примероци беше тестирана јачината на свиткување и беа добиени регресиони равенки кои најдобро го опишуваат процесот и влијанието на параметрите на истиот. Беше заклучено и за двата препрег материјали дека промената на компактниот притисок на ролерот и ласерската температура предизвикуваат варијации во конечните механички резултати, додека влијанието на другиот параметар: аголот на ласер е многу помал, а интеракцијата на факторите има занемарлив ефект врз конечните својства.

Високиот квалитет на ламинатните панели произведени со LATP процесот зависи многу од технолошките параметри за процесирање. Примената на повисока сила на притисок на компактниот ролер за време на процесот на поставување и повисока

температура на ласерот резултираат во добивање на ламинати без дефект со употреба на термопластични (UD1 и UD2) препрег материјали и со повисоки јакостни карактеристики.

5. КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

1. J. Sloan, ATL and AFP: Defining the megatrends in composite aerostructures, *Composites World High-Performance Composites*, **7**, (2008).
2. D. H. – J. A. Lukaszewicz, C. Ward, K. D. Potter, The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future, *Composites Part B: Engineering*, **43**, 997–1009 (2012), DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.12.003.
3. A. J. Corner, D. Ray, W. O. Obande, D. Jones, J. Lyons, I. Rosca, R.M. O' Higgins, M.A. McCarthy, Mechanical characterisation of carbon fibre-PEEK manufactured by laser-assisted automated-tape- placement and autoclave, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **69**, 10–20 (2015), DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.10.003.
4. E. Beyeler, W. Philips, S. I. Gucer, Experimental Investigation of Laser-Assisted Thermoplastic Tape Consolidation, *Journal of thermoplastic composite materials*, **1**, 107–121 (1988), DOI: 10.1177/089270578800100109.
5. R. Schledjewski, Thermoplastic tape placement process – in situ consolidation is reachable, *Plastics, Rubber and Composites*, **38**, 379–386 (2009), DOI: <https://doi.org/10.1179/146580109X12540995045804>.
6. W. J. B. Grouve, G. Vanden Poel, L. L. Warnet, R. Akkerman, On crystallisation and fracture toughness of poly (phenylene sulphide) under tape placement conditions. *Plastics, Rubber and Composites*, **42:7**, 282-288 (2013).
7. D. Abliz, Y. Duan, L. Steuernagel, L. Xie, D. Li, G. Ziegmann, Curing Methods for Advanced Polymer Composites - A Review. *Polymers and Polymer Composites*, **21:6**, 341-348 (2013).
8. W. J. B. Grouve, L. L. Warnet, R. Akkerman, Critical assessment of the mandrel peel test for fiber reinforced thermoplastic laminates, *Engineering Fracture Mechanics*, **101**, 96-108 (2013). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.07.005>.
9. A Deignan, W. F Stanley, M. A McCarthy, Insights into wide variations in carbon fibre/polyetheretherketone rheology data under automated tape placement processing conditions, *Journal of Composite Materials*, **52:16**, 2213-2228 (2018), DOI: <https://doi.org/10.1177/0021998317740733>.
10. A. Barasinski, A. Leygue, E. Soccard, A. Poitou, Identification of non uniform thermal contact resistance in automated tape placement process. *International Journal of Material Forming*, **7:4**, 479-486 (2014).
11. R. Pitchumani, J. W. Gillespie, Jr., M. A. Lamontia, Design and Optimization of a Thermoplastic Tow- Placement Process with In-Situ Consolidation, *Journal of Composite Materials*, **31**, 244-275 (1997), DOI: <https://doi.org/10.1177/002199839703100302>.
12. C. M. Stokes-Griffin, P. Compston, T. I. Matuszyk, M.J. Cardew-Hall, Thermal modelling of the laser-assisted thermoplastic tape placement process, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, **28**, 1445–1462 (2013), DOI: 10.1177/0892705713513285.
13. W.J.B.Grouve, L.L.Warnet, B.Rietman, H.A.Visser, R.Akkerman, Optimization of the tape placement process parameters for carbon-PPS composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **50**, 44–53 (2013) DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.03.003.
14. S. M. Grove, Thermal modelling of tape laying with continuous carbon fibre-reinforced thermoplastic, *Composites*, **19:5**, 367–375 (1988), DOI: 10.1016/0010-4361(88)90124-3.
15. R. Schledjewski, M. Latrille, Processing of unidirectional fiber reinforced tapes - fundamentals on the way to a process simulation tool (ProSimFRT), *Composites Science and Technology*, **63 (14)**, 2111–2118 (2003), DOI: 10.1016/S0266-3538(03)00108-8.
16. J. Colton, J. Muzzy, S. Birger, H. Yang, L. Norpoth, Processing parameters for consolidating PEEK/carbon fiber (APC-2) composites, *Polymer Composites*, **13 (6)**, 421-428

(1992).

17. R.Lichtinger, P.Hörmann, D.Stelzl, R.Hinterholz, The effects of heat input on adjacent paths during Automated Fibre Placement, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **68**, 387–397 (2015), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.10.004>.

18. P. Hormann, D. Stelzl, R. Lichtinger, S.Van Nieuwenhove, G. M., Carro, K.Drechsler, On the numerical prediction of radiative heat transfer for thermoset automated fiber placement, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **67**, 282–288 (2014), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.08.019>.

19. F. Rosselli, M. H. Santare, S. I. Gucer, Effects of processing on laser assisted thermoplastic tape consolidation, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **28** (12), 1023–1033 (1997), DOI: 10.1016/S1359-835X(97)00072-9.

20. F. O. Sonmez, M. Akbulut, Process optimization of tape placement for thermoplastic composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **38** (9), 2013–2023 (2007), DOI: 10.1016/j.compositesa.2007.05.003.

21. F. O. Sonmez, H. T. Hahn, Modeling of Heat Transfer and Crystallization in Thermoplastic Composite Tape Placement Process, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, **10**, 198–240 (1997), DOI: 10.1177/089270579701000301.

22. M. A. Khan, P. Mitschang, R. Schledjewski, Parametric study on processing parameters and resulting part quality through thermoplastic tape placement process, *Journal of Composite Materials*, **47**, 485–499 (2013), DOI: 10.1177/0021998312441810.

23. M. Narnhofer, R. Schledjewski, P. Mitschang, L. Perko, Simulation of the Tape-Laying Process for Thermoplastic Matrix Composites, *Advances in Polymer Technology*, **32**, E705–E713 (2013), DOI: 10.1002/adv.21312.

24. M. A. Khan, P. Mitschang, R. Schledjewski, Identification of some optimal parameters to achieve higher laminate quality through tape placement process, *Advances in Polymer Technology*, **29** (2), 98–111 (2010). DOI: 10.1002/adv.20177.

25. M. A. Khan, P. Mitschang, R. Schledjewski, Parametric study on processing parameters and resulting part quality through thermoplastic tape placement process, *Journal of Composite Materials*, **47**(4), 485–499 (2012), DOI: 10.1177/0021998312441810.

26. C. Kaynak, O. Mat, Uniaxial Fatigue Behavior of Filament Wound Glass-Fiber/Epoxy Composite Tubes, *Composites Science and Technology*, **61**, 1833 -1843 (2001).

27. J. Bai, P. Seeleuthner, P. Bompard, Mechanical Behavior of $\pm 55^\circ$ Filament-Wound Glass-Fibre/Epoxy-Resin Tubes: I. Microstructural Analyses, Mechanical Behavior and Damage Mechanisms of Composite Tubes Under Pure Tensile Loading, Pure Internal Pressure, and Combined Loading, *Composites Science and Technology*, **57**, 141 - 153 (1997).